

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO



Evaluación de la geometría de ánodos impresos en 3D en la generación de energía eléctrica y el tratamiento de aguas residuales municipales en celdas de combustible microbianas

Por:

Natalia Orozco Ordieres

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Saltillo, Coahuila, México

Junio de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Evaluación de la geometría de ánodos impresos en 3D en la generación de energía eléctrica y el tratamiento de aguas residuales municipales en celdas de combustible microbianas

Por:

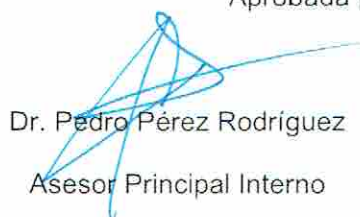
Natalia Orozco Ordieres

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Aprobada por el Comité de Asesoría:



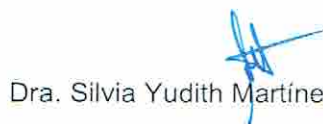
Dr. Pedro Pérez Rodríguez

Asesor Principal Interno



Dr. Alfredo Valentín Reyes Acosta

Asesor Principal Externo



Dra. Silvia Yudith Martínez Amador

Coasesor



M.C. Juan Manuel Cepeda Dovala

Coasesor

Saltillo, Coahuila, México.

Junio de 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Evaluación de la geometría de ánodos impresos en 3D en la generación de energía eléctrica y el tratamiento de aguas residuales municipales en celdas de combustible microbianas

Por:

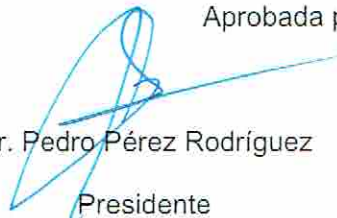
Natalia Orozco Ordieres

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

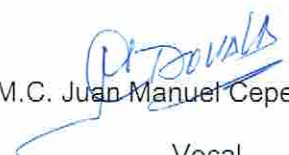
Aprobada por el jurado examinador:


Dr. Pedro Pérez Rodríguez

Presidente


Dra. Silvia Yudith Martínez Amador

Vocal


M.C. Juan Manuel Cepeda Dovala

Vocal


Dr. Alfredo Valentín Reyes Acosta

Vocal suplente




M.C. Sergio Sánchez Martínez

Coordinador de la División de Ingeniería

Buenavista, Saltillo Coahuila, México.

Junio de 2026

DERECHOS DE AUTOR Y DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es la responsable directa y jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (cortar y pegar); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. Así mismo, tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor. Por lo anterior, nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización medio público o privado.

Autor principal


Natalia Orozco Ordieres

Asesor principal


Dr. Pedro Pérez Rodríguez

DEDICATORIA

A mis padres, Eugenia Ordieres Vega y Juan Antonio Orozco Revuelta Toledo, por apoyarme en cada paso de mi carrera, por cada desmañanada llevándome a la universidad, cada desvelada ayudándome a estudiar, por todos los sacrificios que hicieron para asegurarse de que tuviera el mejor desempeño posible en ella. Gracias por siempre estar ahí para echarme porras y empujarme a siempre dar lo mejor de mí.

A mis hermanos, Juan Antonio Orozco Ordieres y Gina Orozco Ordieres, por ser mi muro de carga durante toda la carrera, por estar siempre que creía que mi mundo se estaba cayendo, asegurándome que podía con eso y más, por ese apoyo incondicional que solo un hermano puede dar. Gracias por tanto, sin ustedes yo no estaría aquí.

A mi novio, Carlos Daniel Perales Mayorga, por todas las madrugadas acompañándome mientras estudiaba, por hacerme reír cuando estaba estresada, obligándome a olvidarme de todas mis preocupaciones, por siempre estar para celebrar mis logros y para levantarme de mis caídas. Gracias por enseñarme a vivir el presente y disfrutar la vida al máximo.

A mis amigas y futuras colegas, Dominique Acevedo Chavarría, Monserrath Vargas García, Blanca Ibarra Villanueva y Esmeralda Martínez Hernández por siempre ser la calma en mi caos, por ser mis compañeras de laboratorio, tareas y proyectos. Gracias por ser mis cómplices en todo y por ser las mejores amigas que la universidad me pudo dar.

A mi mejor amigo, Pablo de Jesús Valencia Mendez, por siempre estar en los días más estresantes, haciéndome sentir mejor con sus chistes, escuchándome y sabiendo exactamente que decir para tranquilizarme. Gracias por siempre ser mis ocho minutos cuando lo necesito.

Al Dr. Pedro Pérez Rodríguez, por ser mi principal mentor a lo largo de la carrera, por cada plática, consejo y enseñanza, por hacer del Laboratorio de Química de

Suelos mi lugar seguro. Gracias por ayudarme a crecer no solo académicamente, sino como persona.

AGRADECIMIENTOS

Principalmente quiero agradecer a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, mi *alma mater*, por abrirme sus puertas y darme todas las herramientas necesarias para desarrollarme académicamente y por permitirme aprender de excelentes docentes y compañeros a lo largo de toda mi trayectoria.

A mi asesor principal, el Dr. Pedro Pérez Rodríguez, por confiar en mí durante todo el proceso de la tesis, por transmitirme sus conocimientos y orientarme siempre con paciencia y dedicación, por todos los recursos y el tiempo invertido en mi investigación y su gran aporte en mi desarrollo académico y profesional.

A la Dra. Silvia Yudith Martínez Amador por su apoyo, conocimiento y experiencia a lo largo de la investigación.

Al Dr. Alfredo Valentín Reyes Acosta por su apoyo en la impresión de los ánodos en 3D y su gran dedicación al proyecto.

Al Mc. Juan Manuel Cepeda Dovala por su asesoría durante la investigación y a lo largo de mi carrera, por la gran cantidad de consejos y palabras de aliento que me fueron guiando todo este tiempo hasta lograr mi objetivo.

A la Q.F.B. Brenda Verónica Borrego Limón por su apoyo en la realización de todos los análisis de las muestras, por transmitirme un poco de sus conocimientos de laboratorio con la mejor actitud y paciencia.

A todos los profesores que formaron parte de mi trayectoria académica, por transmitirme sus conocimientos y su pasión por la ciencia.

Especialmente al Dr. José Antonio Hernández Herrera por el apoyo que me brindó a lo largo de toda la carrera, por los conocimientos que me transmitió y los consejos que me dio, por demostrarme lo que significa de verdad amar tu trabajo, siempre será una inspiración para mi desarrollo profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	5
AGRADECIMIENTOS	7
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	8
ÍNDICE DE FIGURAS	9
ÍNDICE DE TABLAS	10
RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	12
OBJETIVO GENERAL	14
HIPÓTESIS	15
REVISIÓN DE LITERATURA.....	16
1.1 Celdas de combustible microbianas (CCM).....	16
1.1.1 Principios de funcionamiento de las CCM.....	16
1.1.2 Aplicaciones en generación de energía eléctrica	17
1.1.3 Aplicaciones en el tratamiento de aguas residuales municipales	18
1.2 Componentes de las CCM	19
1.3 Materiales de electrodos	21
MATERIALES Y MÉTODOS	26
2.1 Fabricación de ánodos impresos en 3D.....	26
2.2 Construcción y operación de las CCM	26
2.3 Caracterización electroquímica de las CCM	28
RESULTADOS Y DISCUSIONES	29
3.1 Voltaje	29
3.2 Densidad de potencia	30
3.3 Eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno (DQO).....	31
3.4 Eficiencia coulombica.....	33
3.5 Curvas de polarización.....	34
3.6 Curvas de densidad de potencia.....	35
CONCLUSIÓN	37
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de las CCM que se utilizaron en este estudio.	27
Figura 2. Voltaje generado en las CCM empacadas con los ánodos impresos en 3D.....	30
Figura 3. Densidad de potencia en las CCM empacadas con los ánodos impresos en 3D.....	31
Figura 4. Eficiencia de remoción de demanda química de oxígeno en las CCM empacadas con los ánodos impresos en 3D.....	32
Figura 5. Eficiencia coulombica en las CCM empacadas con los ánodos impresos en 3D.....	34
Figura 6. Curvas de polarización en las CCM empacadas con los ánodos impresos en 3D.	35
Figura 7. Curvas de densidad de potencia en las CCM empacadas con los ánodos impresos en 3D.	36

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tratamientos evaluados en cada etapa experimental.....	26
--	----

RESUMEN

Las celdas de combustible microbianas (CCM) son sistemas bioelectroquímicos capaces de generar energía eléctrica directamente aprovechable a partir de la oxidación microbiana de la materia orgánica presente en sustratos complejos, como las aguas residuales. El desempeño de estos sistemas depende en gran medida de las propiedades y del diseño de los electrodos, particularmente del ánodo, donde ocurre la transferencia de electrones desde los microorganismos hacia el circuito externo. En este estudio se evaluó el efecto de la geometría de ánodos impresos en 3D en la generación de energía eléctrica y el tratamiento de aguas residuales municipales en celdas de combustible microbianas. Se fabricaron tres tipos de ánodos con diferentes geometrías internas (cuadrícula, hexagonal y triangular) utilizando un filamento conductor a base de Nylon12 y óxido de grafeno mediante impresión 3D. Los ánodos fueron evaluados en celdas de combustible microbianas de doble compartimento alimentadas con agua residual municipal. Se monitoreó el voltaje generado y se determinaron parámetros electroquímicos como densidad de potencia, eficiencia coulombica y curvas de polarización, además de la eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno (DQO). Los resultados mostraron que la geometría del ánodo influyó en el desempeño del sistema. El mejor desempeño se obtuvo con el ánodo de geometría de cuadrícula, el cual alcanzó un voltaje de 178.95 mV, una densidad de potencia de 32.11 mW/m³, una eficiencia de remoción de DQO de 88.17% y una eficiencia coulombica de 1.27%. En conjunto, los resultados indican que la geometría del ánodo impreso en 3D puede influir en el desempeño electroquímico de las CCM, siendo la estructura de cuadrícula la que presentó el mejor rendimiento bajo las condiciones evaluadas.

INTRODUCCIÓN

El incremento de la población ha provocado un aumento considerable en la generación de aguas residuales municipales, lo que representa un reto importante para los sistemas convencionales de tratamiento. Estos procesos suelen implicar altos costos operativos y un consumo significativo de energía, por lo que existe un creciente interés en el desarrollo de tecnologías sostenibles capaces de tratar estos efluentes y, al mismo tiempo, aprovechar la energía contenida en la materia orgánica presente en ellos.

Las celdas de combustible microbianas (CCM) son sistemas bioelectroquímicos que permiten convertir la energía química de compuestos orgánicos en energía eléctrica mediante la actividad metabólica de microorganismos electroactivos como catalizadores. En estos sistemas, los microorganismos oxidan la materia orgánica presente en el sustrato, liberando electrones y protones que participan en reacciones electroquímicas que generan corriente eléctrica. Debido a esta capacidad, las CCM han sido ampliamente estudiadas como una alternativa prometedora para la generación de bioelectricidad y el tratamiento simultáneo de efluentes contaminados.

El desempeño de las CCM depende en gran medida de las características de sus componentes, particularmente de los electrodos. El ánodo constituye la superficie donde los microorganismos electroactivos se adhieren y transfieren los electrones generados durante la oxidación de la materia orgánica, por lo que propiedades como la conductividad eléctrica, la biocompatibilidad y el área superficial del material influyen directamente en la eficiencia del sistema. En este sentido, los materiales a base de carbono han sido ampliamente utilizados debido a su estabilidad química, buena conductividad y compatibilidad con los microorganismos. Entre ellos, el grafeno destaca por su alta conductividad eléctrica, gran área superficial y elevada resistencia mecánica, lo que lo convierte en un material prometedor para mejorar el rendimiento de las CCM.

En años recientes, la impresión 3D ha emergido como una herramienta innovadora para la fabricación de electrodos con arquitecturas controladas. Esta tecnología permite diseñar materiales con porosidad y área superficial optimizadas, lo que puede favorecer la formación de biopelículas microbianas y mejorar la transferencia de electrones dentro del sistema.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la geometría de ánodos impresos en 3D en la generación de energía eléctrica y el tratamiento de aguas residuales municipales en celdas de combustible microbianas.

Objetivos específicos.

1. Fabricar los ánodos mediante impresión en 3D con tres tipos de geometrías.
2. Evaluar la generación de energía eléctrica y remoción de materia orgánica de las celdas de combustible microbianas empacadas con los ánodos fabricados durante el tratamiento de aguas residuales municipales.
3. Caracterizar electroquímicamente las celdas de combustible microbianas.

HIPÓTESIS

La modificación de la geometría de ánodos impresos en 3D incrementará la generación de energía eléctrica y el tratamiento de aguas residuales municipales en celdas de combustible microbianas.

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 Celdas de combustible microbianas (CCM)

Las celdas de combustible microbianas (CCM) son una tecnología emergente y prometedora para la generación de energía eléctrica (Logan, 2008). Pueden ser definidas como dispositivos bioelectroquímicos que aprovechan la actividad metabólica de microorganismos, denominados electrógenos, que actúan como catalizadores biológicos que degradan u oxidan la materia orgánica y convierten la energía química presente en sustratos orgánicos en energía eléctrica aprovechable (Bermúdez-Montaña y Bernal-Aragón, 2018). Pueden operar a partir de sustratos como son: aguas residuales domésticas, de origen animal o sintéticas (Guzmán, 2016).

1.1.1 Principios de funcionamiento de las CCM

El diseño más común de las CCM es el de doble cámara, el cual consiste en una cámara anódica que opera en condiciones anaerobias, y una cámara catódica la cual es aerobia. Estas dos cámaras se encuentran separadas por una membrana de intercambio catiónico, protónico o un puente de intercambio iónico/salino, que permite el paso de cationes, protones o iones, respectivamente (Bermúdez-Montaña y Bernal-Aragón 2018). En la cámara anódica, los microorganismos oxidan la materia orgánica liberando electrones, protones y CO₂. Los electrones son transferidos al ánodo, a menudo por bacterias exoelectrógenas las cuales forman una biopelícula (Ríos-Lara, 2016), y luego viajan a través de un circuito externo pasando a través de una resistencia eléctrica hacia el cátodo, generando la corriente eléctrica (Medina-Mesa y Zapata-Rojas, 2017). Los protones producidos en el ánodo migran a través de la membrana hacia la cámara catódica. En el cátodo, estos protones se combinan con los electrones provenientes del circuito externo y un aceptor de electrones, (que típicamente es el oxígeno que puede ser

suministrado por aire), resultando en la formación de agua (Bermúdez-Montaña y Bernal-Aragón, 2018). Aunque este diseño es el más común, cabe recalcar que existen otras configuraciones, como las CCM de una sola cámara (Logan, 2008).

1.1.2 Aplicaciones en generación de energía eléctrica

Aunque inicialmente la eficiencia de las CCM era limitada, las constantes mejoras en el diseño, los componentes y las condiciones de operación han llevado a un incremento significativo en su capacidad de generación de energía (Tharali et al., 2016). Esta tecnología se ha establecido como un medio prometedor para la producción de energía sostenible y el tratamiento de residuos (Rismani-Yazdi et al., 2008).

La producción de bioelectricidad es una aplicación fundamental de las CCM. Su principal ventaja radica en la capacidad de utilizar sustratos orgánicos complejos como residuos agrícolas, industriales y municipales para la generación de energía eléctrica. Las CCM tienen la particularidad de evitar el ciclo de Carnot (principio termodinámico que establece el límite máximo teórico de eficiencia para la conversión de energía térmica en otras formas de energía), lo que les permite alcanzar eficiencias de conversión energética superiores al 70% (Tharali et al., 2016). Varios estudios han demostrado la capacidad de las CCM para generar electricidad con diferentes rendimientos:

- Cohen (1931) obtuvo 35 V a una corriente de 0.2 mA de un sistema de celdas de combustible bacterianas apiladas. Este logro temprano es a menudo referido como el origen de la bioelectroquímica.
- Aelterman et al. (2006), al conectar varias CCM apiladas en serie o en paralelo, logrando una producción de energía de 228–248 W/m³. Además, un estudio de este mismo grupo reportó seis unidades individuales de CCM conectadas en configuración apilada produciendo un voltaje seis veces mayor.
- Qiao et al. (2007) produjeron un voltaje de 450 mV en una CCM con un ánodo compuesto de nanotubos de carbono y polianilina (CNT/PANI).

- You et al. (2017) reportaron que sus CCM con membranas impresas en 3D lograron un voltaje de 346 mV (para 7.98 de tasa de carga orgánica, OLR por sus siglas en inglés), 320 mV (5.93 OLR), 290 mV (3.96 OLR), y 256 mV (1.98 OLR).

1.1.3 Aplicaciones en el tratamiento de aguas residuales municipales

A la fecha, existen múltiples formas en que los sistemas bioelectroquímicos se han utilizado para el tratamiento de aguas residuales, de entre las que destacan:

- Remoción de carga orgánica: uno de los objetivos principales de las celdas de combustible microbianas es la reducción de la carga orgánica presente en el agua residual municipal (Bermúdez-Montaña y Bernal-Aragón, 2018). La eficiencia de las CCM se evalúa mediante la remoción de la carga orgánica. Autores como Guzmán (2016) han demostrado la disminución significativa de la demanda química de oxígeno (DQO) tanto en estudios con agua residual sintética como con agua residual municipal.
- Potencial de implementación a diferentes escalas: la tecnología de CCM se considera con potencial para ser utilizada a gran escala en el tratamiento de aguas residuales de hasta una ciudad entera (Guzmán, 2016). También, se consideran factibles para su instalación en pequeñas comunidades habitacionales o lugares aislados, adaptándose a diversas necesidades de tratamiento municipal (Slate et al., 2019).
- Reducción de contaminación: las CCM tienen un notable potencial para la biorremediación y el tratamiento de diversos contaminantes en aguas residuales. Se ha demostrado su eficacia en la eliminación de metales pesados como cromo, vanadio y hierro (Tharali et al., 2016). Las CCM también son capaces de degradar hidrocarburos presentes en aguas residuales de la industria petroquímica, así como de tratar aguas residuales farmacéuticas (Gude, 2016) y desechos orgánicos complejos como lixiviados de vertederos y lodos residuales (Tharali et al., 2016).

1.2 Componentes de las CCM

Para el funcionamiento eficiente de las celdas, se necesita de la interacción coordinada de varios componentes. Se componen fundamentalmente de un ánodo, un cátodo, una membrana de intercambio catiónico, microorganismos electroactivos y un sustrato (Tharali, 2016).

1.2.1 Ánodo

El ánodo es el componente donde los exoelectrógenos oxidan la materia orgánica presente en el sustrato, produciendo electrones y protones. Es crucial porque actúa como aceptor de electrones para los microorganismos en condiciones de anaerobiosis en el sistema. Varios factores influyen en la eficiencia del ánodo, incluyendo la conductividad, el área superficial y la biocompatibilidad del material de fabricación (Corona-Martínez et al., 2025).

1.2.2 Cátodo

El cátodo es el electrodo que recibe los electrones generados por la oxidación de la materia orgánica en el ánodo. Estos electrones se utilizan para reducir el oxígeno y otros compuestos aceptores de electrones, como nitritos, nitratos y sulfatos. Dependiendo de la configuración de las CCM, el cátodo puede promover la formación de productos como hidrógeno, biopolímeros y otros químicos. La eficiencia del cátodo puede impactar significativamente la cantidad de energía eléctrica generada en las CCM (Corona-Martínez et al., 2025).

1.2.3 Membrana de intercambio catiónico

Es una membrana semipermeable que se caracteriza por tener grupos funcionales cargados negativamente que facilitan el transporte selectivo de cationes a través de la membrana, impidiendo el movimiento de aniones (Tharali et al., 2016). Separan las cámaras anódica y catódica, permitiendo el transporte de protones (y otros

cationes presentes en el sustrato) generados en la superficie del ánodo hacia el cátodo. Este proceso es indispensable para mantener la electroneutralidad del sistema. Además, minimizan la difusión de oxígeno de la cámara catódica a la anódica, lo que, si no se evita, disminuiría considerablemente el rendimiento del sistema (Corona-Martínez et al., 2025).

1.2.4 Inóculo

Funcionan como catalizadores biológicos, facilitando las reacciones de oxidación-reducción utilizando los electrodos como aceptores (ánodo) o donantes (cátodo) de electrones. Su papel en las CCM depende del tipo de sistema y del microorganismo seleccionado (Corona-Martínez et al., 2025). Pueden ser cepas puras o consorcios microbianos mixtos (Logan, 2006).

- Tipos de microorganismos: los exoelectrógenos se han identificado en los tres dominios de clasificación biológica (bacterias, arqueas y eucariotas). Ejemplos de exoelectrógenos bien estudiados incluyen *Geobacter sulfurreducens* y *Shewanella oneidensis*, así como *Pseudomonas aeruginosa* y *Escherichia coli* (Corona-Martínez et al., 2025). Otras especies importantes incluyen *Rhodopseudomonas palustris* y cepas de cianobacterias como *Anabaena* y *Nostoc* (Tharali et al., 2016).

1.2.5 Sustrato

Es la fuente que proporciona la materia orgánica que los microorganismos (inóculo) oxidan para generar electrones. La naturaleza (composición química y biodegradabilidad) y la concentración (concentraciones bajas o altas pueden inhibir el crecimiento de exoelectrógenos) del sustrato definen en gran medida la eficiencia y el rendimiento de las CCM (Corona-Martínez et al., 2025).

- Tipos de sustratos: el sustrato puede variar en complejidad. Algunos ejemplos incluyen glucosa, acetato, lactato, aguas residuales (municipales e industriales), residuos sólidos (lodos, residuos alimentarios y biomasa

lignocelulósica) y sustratos gaseosos (CO y CO₂) (Corona-Martínez et al., 2025; Pant et al., 2010).

1.3 Materiales de electrodos

Los electrodos utilizados en las celdas de combustible microbianas pueden ser de diversos materiales, y su elección es crucial pues impacta directamente en el rendimiento y el costo de estos dispositivos. Dichos materiales deben ser conductores, biocompatibles y químicamente estables en el ambiente del reactor. La selección adecuada del material del electrodo es fundamental, ya que influye en la capacidad de las bacterias para adherirse, la eficiencia en la transferencia de electrones y el rendimiento electroquímico general de la celda. Además, una mayor área superficial de los electrodos es un factor clave para lograr una densidad de corriente más alta (Tharali et al., 2016).

1.3.1 Metales

Los metales se emplean principalmente como catalizadores en el cátodo o como materiales base en ánodos, aunque algunos, como el cobre, son tóxicos para las bacterias (Logan, 2006).

- Platino: es el catalizador más popular para la reducción de oxígeno en cátodos debido a su baja resistividad y excelente capacidad catalítica (Rismani-Yazdi et al., 2008). Se utiliza recubierto sobre electrodos de carbono, a menudo con aglutinantes como Nafion o PTFE (Logan, 2006).
- Oro: se ha utilizado en electrodos recubiertos de cobre como cátodos (Rismani-Yazdi et al., 2008). En el estudio de Slate et al. (2019), el oro mostró una densidad de corriente máxima de $1175 \mu\text{A cm}^{-2}$.
- Cobre: las nanopartículas de cobre se utilizan en cátodos por sus propiedades electrocatalíticas (Corona-Martínez et al., 2025). En el estudio de Slate et al. (2019) los electrodos de cobre han mostrado la densidad de

corriente máxima más alta ($1515 \mu\text{A cm}^{-2}$) entre los metales nobles y no nobles.

- Níquel: el níquel puede usarse con fibras de carbono en aplicaciones de celdas de combustible microbianas aplicadas en ambientes marinos (Logan, 2006). Las nanopartículas de níquel se utilizan para fabricar cátodos y ánodos, aumentando el área superficial y la conductividad (Corona-Martínez et al., 2025).
- Acero inoxidable: puede utilizarse como ánodo en las celdas de combustible microbianas. En el estudio de Kalathil et al., 2018, un ánodo de acero inoxidable superó a un electrodo de grafito plano, también se demostró que la esponja de acero inoxidable aumenta la corriente producida por los bioánodos microbianos.
- Manganeso y derivados: se utilizan como catalizadores catódicos, siendo el MnO_2 una alternativa al platino (Oliveira et al., 2013). Los microorganismos oxidantes de manganeso pueden regenerar el material del cátodo a su estado oxidado (Franks y Nevin, 2010).
- Hierro y derivados: el ferricianuro ($[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$) y el permanganato (MnO_4^-) son aceptores de electrones comunes en la cámara catódica (Tharali et al., 2016). Las ftalocianinas de hierro (II) pirolizadas y el tetrametoxifenilporfirina de cobalto (CoTMPP) se han propuesto como catalizadores catódicos no preciosos (sin metales nobles) (Logan, 2006).
- Cobalto y derivados: el CoTMPP es un catalizador metálico no precioso utilizado para recubrir superficies catódicas, logrando densidades de potencia de 18 W/m^3 (Tharali et al., 2016).
- Paladio: las nanopartículas de paladio se han utilizado para aumentar el área superficial y la conductividad eléctrica de los ánodos a base de carbono (Corona-Martínez et al., 2025). El paladio se está probando como material catódico debido a sus excelentes propiedades catalíticas y bajo costo (Mustakeem, 2015).

- Dióxido de plomo (PbO_2): se ha utilizado como catalizador alternativo para cátodos de CCM, mostrando un rendimiento de potencia mejorado y menor costo que el Pt/C (catalizador de platino) (Mustakeem, 2015).

1.3.2 Materiales a base de carbono

Los materiales a base de carbono son los más utilizados como electrodos, tanto en el ánodo como en el cátodo, debido a su versatilidad, alta conductividad eléctrica, biocompatibilidad, estabilidad química y bajo costo (Kalathil et al., 2018).

- Grafito: se presenta en diversas formas como placas, barras, gránulos, fieltro, espuma y cepillos (Logan, 2006). Destaca por su alta estabilidad y conductividad, siendo fácil de manejar y de costo relativamente bajo (Mustakeem, 2015). Estudios como el de Therali et al., (2016), han demostrado que los ánodos de cepillo de grafito pueden ser muy efectivos, produciendo altas densidades de potencia (hasta 2400 mW/m^2).
- Tela de carbono: es un material común para electrodos, especialmente en cátodos. Ofrece buena conductividad, estabilidad, disponibilidad comercial y costo relativamente bajo (Slate et al., 2019).
- Papel de carbono: utilizado como ánodo. Es frágil, pero facilita la conexión del colector de electrones (Mustakeem, 2015).
- Filtro de carbono: un material fibroso con grandes áreas superficiales. Presenta una buena conductividad de corriente, superando a la espuma de carbono y el grafito (Logan, 2006). Sin embargo, cuenta con una limitación, sus poros pueden obstruirse, reduciendo el área superficial activa (Slate et al., 2019).
- Espuma de carbono: aunque su rendimiento es inferior al filtro de carbono en conductividad (Therali et al., 2016), la espuma de carbono reticulada ha mostrado una buena densidad de corriente (Kalathil et al., 2018).
- Nanotubos de carbono: son prometedores por su conductividad eléctrica, estabilidad química, biocompatibilidad, alta área específica y propiedades

catalíticas (Mustakeem, 2015). Pueden mejorar la eficiencia de las celdas como modificación de ánodo (Therali et al., 2016).

- Grafeno y óxido de grafeno: materiales 2D con propiedades únicas como alta resistencia física, movilidad/conductividad de electrones y gran área superficial teórica. Un ánodo modificado con grafeno ha demostrado mejorar el rendimiento de las celdas de combustible microbianas (Therali et al., 2016). El grafeno dopado con nitrógeno ha mostrado ser un catalizador para la reacción de reducción de oxígeno comparable al platino (Slate et al., 2019).

1.3.3 Polímeros conductores

Los polímeros conductores se utilizan principalmente para modificar las superficies de los electrodos, mejorando la transferencia de electrones y la biocompatibilidad.

- Polianilina (PANI): utilizada para aumentar la eficiencia de los electrodos (Therali et al., 2016). Sus propiedades incluyen alta capacidad específica, flexibilidad, bajo costo y buena estabilidad térmica (Wang et al., 2016).
- Polipirrol (PPy): preferido para la modificación de ánodos por su fácil síntesis, elevada conductividad eléctrica, propiedades redox, alta capacitancia específica, baja resistencia a la transferencia de carga, estabilidad química y biocompatibilidad. Sin embargo, puede presentar limitaciones como menor conductividad eléctrica, hinchamiento, contracción y poca estabilidad (Gnana-Kumar et al., 2014).
- Politetrafluoroetileno (PTFE): se utiliza como aglutinante para catalizadores en cátodos, especialmente con platino (Logan, 2006). También forma parte de las capas de difusión en cátodos de aire (Therali et al., 2016).
- Polidopamina (PDA): utilizada para modificar el fieltro de grafito, mejorando la biocompatibilidad para las bacterias electroactivas y la densidad de potencia de las celdas de combustible microbianas (Corona-Martínez et al., 2025).

1.3.4 Materiales innovadores

La investigación continúa explorando nuevos materiales y configuraciones para mejorar el rendimiento y la escalabilidad de las celdas de combustible microbianas, entre estos materiales destacan:

- Materiales impresos en 3D: los ánodos de carbono poroso fabricados con tecnología de impresión 3D han demostrado mejorar la actividad metabólica de los microorganismos y la rugosidad superficial, logrando una potencia superior a la tela de carbono y el cepillo de fibra de carbono. Estos materiales son de bajo costo y ofrecen gran control sobre la porosidad. Se ha explorado también el uso de cobre poroso impreso en 3D como ánodo (Bian et al., 2018).
- Materiales cerámicos: electrodos cerámicos macroporosos recubiertos con una delgada capa de óxido de estaño dopado con flúor han mostrado una densidad de potencia 16 veces mayor en comparación con ánodos de carbono con buen rendimiento (Slate et al., 2019).
- Nanomateriales e híbridos: la incorporación de nanomateriales e híbridos avanzados en la composición de los electrodos ha sido clave para la continua optimización del rendimiento de las celdas de combustible microbianas. En el cátodo, se ha logrado una alta densidad de potencia con aerogeles de carbono dopados con nitrógeno (Therali et al., 2016). Por otro lado, las modificaciones anódicas incluyen compuestos como los de nanotubos de carbono/polianilina y grafeno/espumas de níquel 3D (Slate et al., 2019). Para los biocátodos, materiales como los granulados de semicoque y carbón activado han mostrado buenos resultados como materiales de electrodo (Gude, 2016). Además, se están investigando activamente diversos híbridos, incluyendo el óxido de manganeso/grafeno y materiales de metal/polímero como las espumas de cobre/melamina (Kalathil et al., 2018).

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Fabricación de ánodos impresos en 3D

Para la fabricación de los ánodos, un filamento conductivo con base Nylon12 y óxido de grafeno (marca Color Plus) se cargó y extruyó en una impresora 3D (Bambu Lab, X1E COMBO), evaluando tres geometrías distintas, las cuales se muestran en la tabla 1.

Tratamiento	Geometría interna del material
T ₁	Cuadrada
T ₂	Hexagonal
T ₃	Triangular

Tabla 1. Tratamientos evaluados en cada etapa experimental.

2.2 Construcción y operación de las CCM

La figura 1 muestra la configuración de las CCM que se emplearon en los experimentos. Se utilizaron celdas de combustible microbianas de doble compartimento, con un volumen aproximado de 2000 mL (1000 mL cada compartimento), agregando una pieza de fieltro de grafito (10 × 10 × 0.8 cm) en el compartimento catódico (cátodo) y 1000 mL de agua desionizada como solución catolítica (oxigenando la solución de forma externa con una bomba de aire acoplada a un difusor). En el compartimento anódico se colocó uno de los ánodos previamente fabricados, y 1000 mL de agua residual municipal cruda como sustrato (e inóculo). Se utilizó una membrana de intercambio catiónico pre-hidratada (NaCl 5%, 12 h) para separar los compartimentos. La distancia entre ánodo y cátodo fue de 2 cm. El monitoreo de las celdas se llevó a cabo utilizando un multímetro digital (Fluke 289 - Trendcapture), con el cual se determinó el voltaje (V) de cada celda una vez al día durante toda la reacción (27 días, utilizando los primeros 15 días

como acondicionamiento para asegurar el desarrollo de la biopelícula en la superficie de los ánodos), empleando una resistencia externa de 1 k Ω para cerrar el circuito y un alambre de acero inoxidable como colector de electrones. La densidad de potencia (mW/m³) generada en las CCM se calculó como:

$$P_v = \frac{UI}{V} \times 1000$$

donde U es el voltaje (V), I es la corriente eléctrica (A) y V es el volumen del compartimento anódico (Luo et al., 2010). Por otra parte, la eficiencia coulombica (%) fue calculada como:

$$E_{Cb} = \frac{M \int_0^t I dt}{FbV_{An}\Delta COD}$$

donde $M = 32$ es el peso molecular del oxígeno, I es la corriente eléctrica, $F = 96,485.33$ C/mol es la constante de Faraday, $b = 4$ es el número de electrones intercambiados por mol de oxígeno, V_{An} es el volumen del sustrato en el compartimento anódico, y ΔDQO es la diferencia de DQO a través del tiempo (Logan y Regan, 2006). Finalmente, la demanda química de oxígeno (DQO) se determinó al inicio y al final de la reacción para evaluar la remoción de materia orgánica en el sistema (NMX-AA-030/2-SCFI-2011).

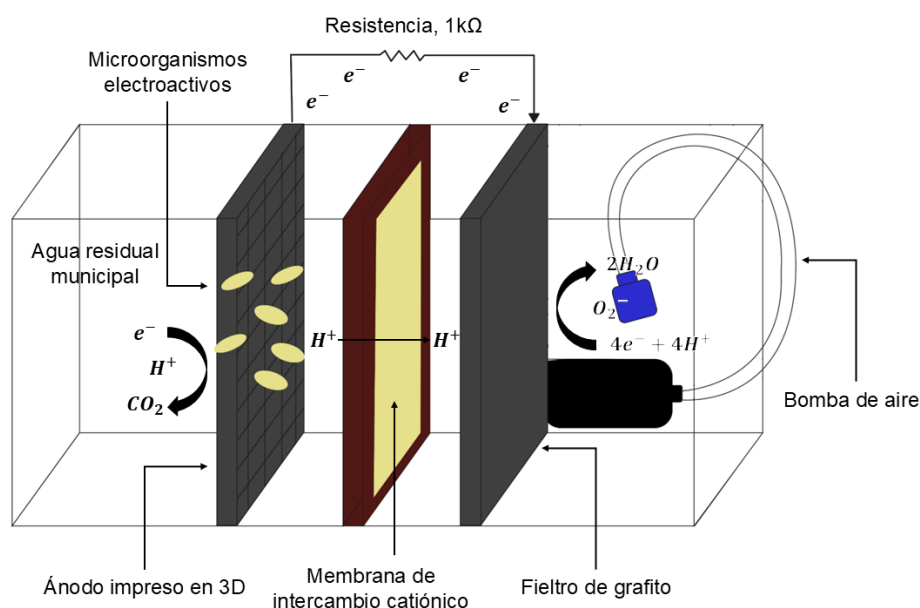


Figura 1. Esquema de las CCM que se utilizaron en este estudio.

2.3 Caracterización electroquímica de las CCM

Las curvas de polarización y de densidad de potencia se determinaron por el método de resistencia variable al modificar la resistencia externa aplicada al sistema, en un rango de entre 50×10^{-3} y $100 \text{ k}\Omega$, una vez estabilizado el voltaje. La densidad de potencia obtenida por este método se normalizó al volumen del compartimento anódico.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Voltaje

En la figura 2 se puede observar el voltaje generado por las CCM escala laboratorio de doble compartimento empacadas con los ánodos impresos en 3D. En esta imagen se observa que el voltaje máximo generado por los ánodos de geometría de cuadrícula, hexagonal y triangular fue de 178.95 mV, 168.15 mV y 166.4 mV, respectivamente. Las diferencias observadas en el voltaje generado sugieren que la geometría interna de los ánodos impresos en 3D influye en el desempeño electroquímico de las celdas de combustible microbianas. El mayor voltaje obtenido con la geometría de cuadrícula podría estar relacionado con una mayor área superficial efectiva disponible para la colonización de microorganismos electroactivos y la formación de biopelículas en la superficie del ánodo (Yin et al., 2026). Una mayor área de contacto entre los microorganismos y el material conductor favorece la transferencia de electrones hacia el electrodo, lo que se traduce en un incremento en la generación de corriente y voltaje en el sistema. Asimismo, la arquitectura interna del material anódico puede influir en el transporte de masa dentro del compartimento anódico (Banerjee et al., 2022). Geometrías que faciliten la difusión del sustrato y la eliminación de productos metabólicos pueden favorecer la actividad microbiana y la oxidación de la materia orgánica presente en el agua residual. En este sentido, la geometría de cuadrícula podría haber proporcionado condiciones más favorables para el crecimiento microbiano y la transferencia de electrones en comparación con las geometrías hexagonal y triangular.

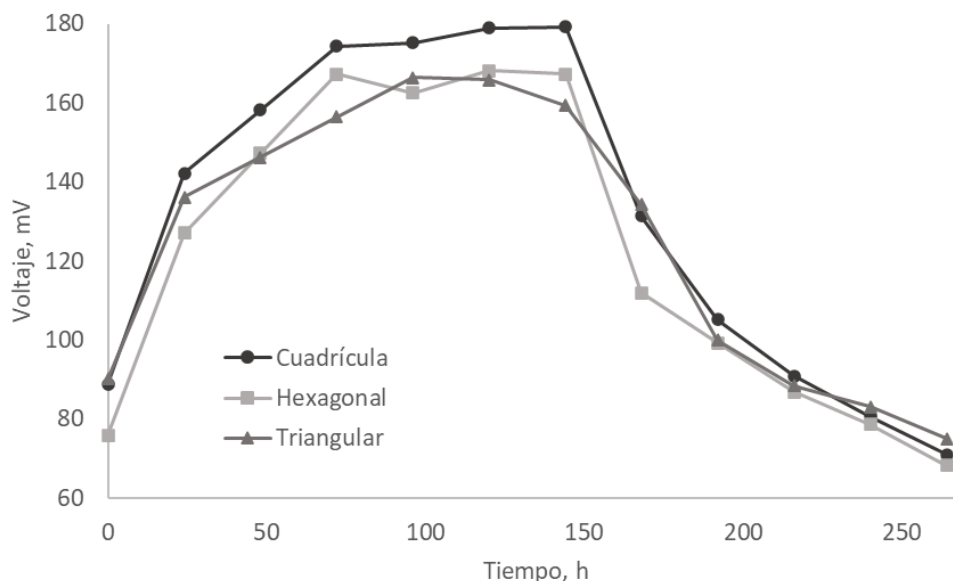


Figura 2. Voltaje generado en las CCM empacadas con los ánodos impresos en 3D.

3.2 Densidad de potencia

En la figura 3 se puede observar la densidad de potencia generada por las CCM escala laboratorio de doble compartimento empacadas con los ánodos impresos en 3D. En esta imagen se observa que la densidad de potencia máxima generada por los ánodos de geometría de cuadrícula, hexagonal y triangular fue de 32.11 mW/m^3 , 28.27 mW/m^3 y 27.69 mW/m^3 respectivamente. La densidad de potencia generada en las celdas de combustible microbianas refleja la capacidad del sistema para convertir la energía química contenida en el sustrato en energía eléctrica. Las diferencias observadas entre los tratamientos indican que la geometría del ánodo también influye en la eficiencia de conversión energética del sistema. La mayor densidad de potencia obtenida con la geometría de cuadrícula puede atribuirse a una mejor interacción entre la biopelícula microbiana y la superficie conductora del ánodo. Una mayor área superficial y una distribución más uniforme de los poros dentro de la estructura del material favorecen tanto la adhesión microbiana como la transferencia de electrones, lo que incrementa la corriente generada en el sistema. Por el contrario, geometrías con menor accesibilidad o menor uniformidad

estructural pueden limitar parcialmente estos procesos, reduciendo el rendimiento electroquímico (Ahmed et al., 2015). Estos resultados son consistentes con estudios previos que indican que el diseño estructural de los electrodos es un factor clave en el desempeño de las celdas de combustible microbianas, ya que influye directamente en la colonización microbiana, la transferencia electrónica y el transporte de masa dentro del reactor (Di Lorenzo et al., 2010).

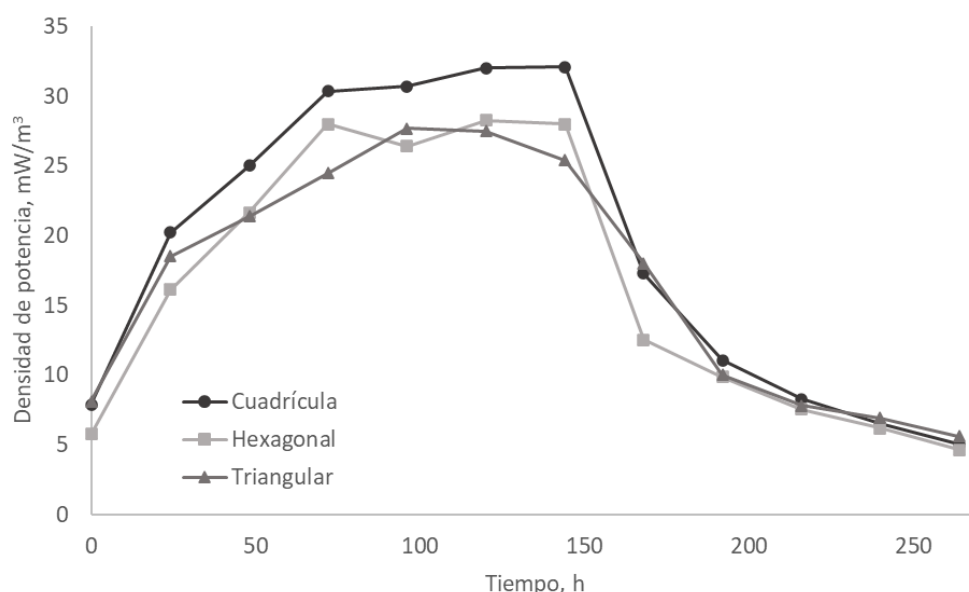


Figura 3. Densidad de potencia en las CCM empacadas con los ánodos impresos en 3D.

3.3 Eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno (DQO)

En la figura 4 se puede observar la eficiencia de remoción de la DQO en las CCM escala laboratorio de doble compartimento empacadas con los ánodos impresos en 3D. En esta imagen se observa que la eficiencia de remoción alcanzada por los ánodos de geometría de cuadrícula, hexagonal y triangular al finalizar los experimentos fue de 88.17%, 86.24% y 85.07% respectivamente. La alta eficiencia de remoción de la DQO observada en los tres tratamientos indica que las celdas de combustible microbianas fueron capaces de degradar una proporción importante de

la materia orgánica presente en el agua residual municipal. Esto confirma que, además de generar energía eléctrica, el sistema funcionó de manera efectiva como un proceso de tratamiento biológico. Las pequeñas diferencias observadas entre las geometrías evaluadas podrían estar relacionadas con variaciones en la actividad microbiana y en la interacción entre los microorganismos y la superficie del ánodo. Una mayor área superficial y mejores condiciones para el desarrollo de biopelículas electroactivas pueden favorecer la oxidación de compuestos orgánicos, incrementando la eficiencia de remoción de DQO (Chen et al., 2015). En general, los resultados obtenidos coinciden con diversos estudios que reportan altas eficiencias de remoción de materia orgánica en celdas de combustible microbianas alimentadas con aguas residuales, lo que demuestra el potencial de esta tecnología para integrar procesos de tratamiento de efluentes con recuperación de energía (Yang et al., 2022).

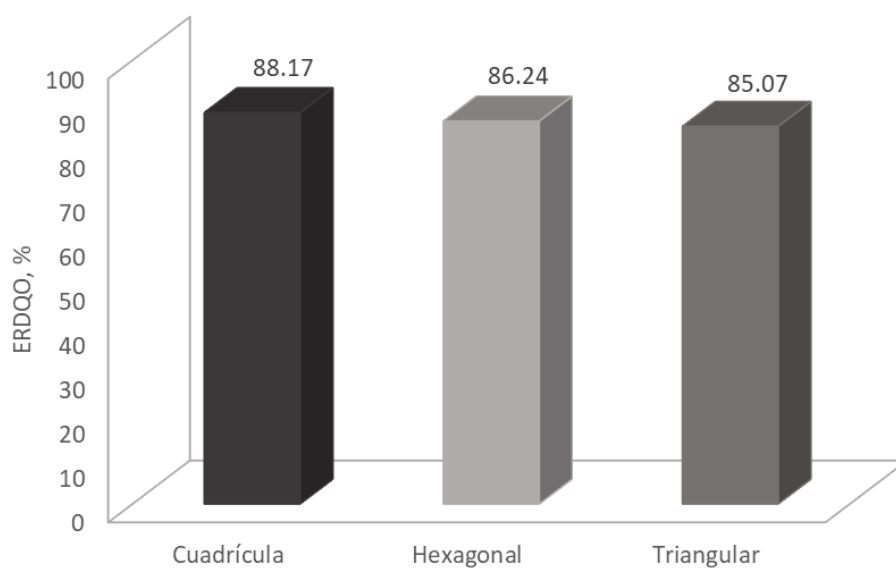


Figura 4. Eficiencia de remoción de demanda química de oxígeno en las CCM empacadas con los ánodos impresos en 3D.

3.4 Eficiencia coulombica

En la figura 5 se puede observar la eficiencia coulombica en las CCM escala laboratorio de doble compartimento empacadas con los ánodos impresos en 3D. En esta imagen se observa que la eficiencia coulombica alcanzada por los ánodos de geometría de cuadrícula, hexagonal y triangular fue de 1.27%, 1.21% y 1.25% respectivamente. La eficiencia coulombica representa la fracción de electrones provenientes de la oxidación de la materia orgánica que son recuperados en forma de corriente eléctrica en el circuito externo (Qazani et al., 2024). Los valores obtenidos en este estudio indican que solo una pequeña proporción de los electrones generados fue convertida en electricidad, lo cual es un comportamiento común en celdas de combustible microbianas que operan con consorcios microbianos complejos y sustratos reales como aguas residuales. Esto se debe a que parte de los electrones liberados durante la degradación de la materia orgánica son utilizados por los microorganismos en rutas metabólicas alternativas, como la producción de biomasa o procesos fermentativos, en lugar de ser transferidos al ánodo. Asimismo, pueden ocurrir pérdidas electrónicas debido a la presencia de aceptores de electrones competidores o a limitaciones en la transferencia electrónica entre los microorganismos y el electrodo (Bazina et al., 2023). A pesar de ello, los valores obtenidos reflejan el funcionamiento del sistema bioelectroquímico y son comparables con los reportados en otros estudios que utilizan aguas residuales reales como sustrato en celdas de combustible microbianas.

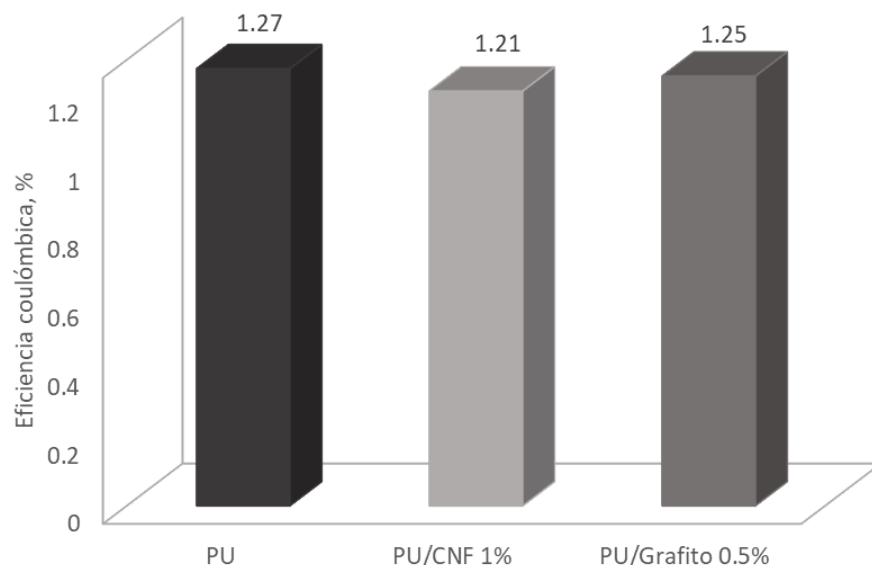


Figura 5. Eficiencia coulombica en las CCM empacadas con los ánodos impresos en 3D.

3.5 Curvas de polarización

En la figura 6 se pueden observar las curvas de polarización obtenidas durante la caracterización electroquímica de las CCM escala laboratorio de doble compartimento empacadas con los ánodos impresos en 3D. En esta imagen se observa que la resistencia de cada uno de los ánodos de geometría de cuadrícula, hexagonal y triangular fue de 1780.46 Ω , 1715.13 Ω y 1613.59 Ω respectivamente. Las curvas de polarización permiten evaluar el comportamiento electroquímico del sistema y estimar la resistencia interna de las celdas de combustible microbianas. Las diferencias observadas entre los tratamientos indican que la geometría del ánodo también influye en la resistencia interna del sistema. La resistencia interna puede estar asociada a diversos factores, entre ellos la conductividad del material del electrodo, la transferencia de electrones entre los microorganismos y el ánodo, la resistencia del electrolito (agua residual municipal) y las pérdidas asociadas al transporte de protones a través de la membrana de intercambio. Una estructura geométrica que favorezca el contacto microbiano y el transporte de electrones puede contribuir a reducir estas pérdidas, mejorando el desempeño electroquímico

del sistema (Taufemback et al., 2024). En este sentido, las variaciones observadas entre las geometrías evaluadas sugieren que la arquitectura del material anódico puede modificar la dinámica de transferencia electrónica dentro de las celdas de combustible microbianas.

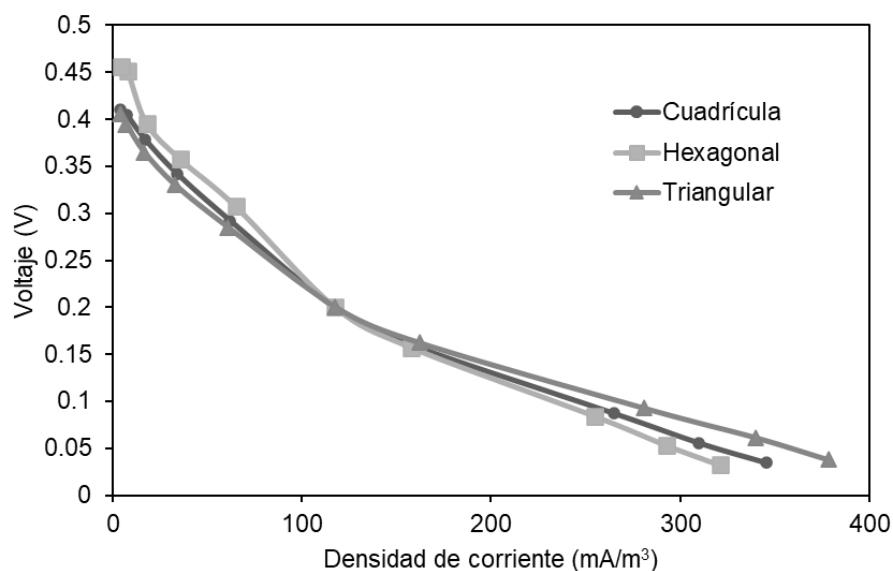


Figura 6. Curvas de polarización en las CCM empacadas con los ánodos impresos en 3D.

3.6 Curvas de densidad de potencia

En la figura 7 se pueden observar las curvas de densidad de potencia obtenidas durante la caracterización electroquímica de las CCM escala laboratorio de doble compartimento empacadas con los ánodos impresos en 3D. En esta imagen se observa que la densidad de potencia máxima generada por los ánodos de geometría de cuadrícula, hexagonal y triangular es de 25.34 mW/m^3 , 24.81 mW/m^3 y 26.31 mW/m^3 , respectivamente. Las curvas de densidad de potencia permiten analizar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de carga externa y determinar el punto de máxima producción de energía. Las diferencias observadas entre los tratamientos reflejan nuevamente la influencia de la geometría del ánodo en el desempeño electroquímico de las celdas. La variación en la densidad de potencia puede estar relacionada con la forma en que la arquitectura interna del

electrodo afecta la transferencia de electrones y el transporte de masa dentro del sistema. Geometrías que proporcionan una mayor accesibilidad a la superficie conductora y una distribución más homogénea de los espacios internos pueden favorecer la formación de biopelículas electroactivas más eficientes y mejorar la generación de corriente (Mahto y Das, 2025). En conjunto, estos resultados indican que el diseño geométrico de los ánodos impresos en 3D representa un factor relevante en la optimización del desempeño de las celdas de combustible microbianas.

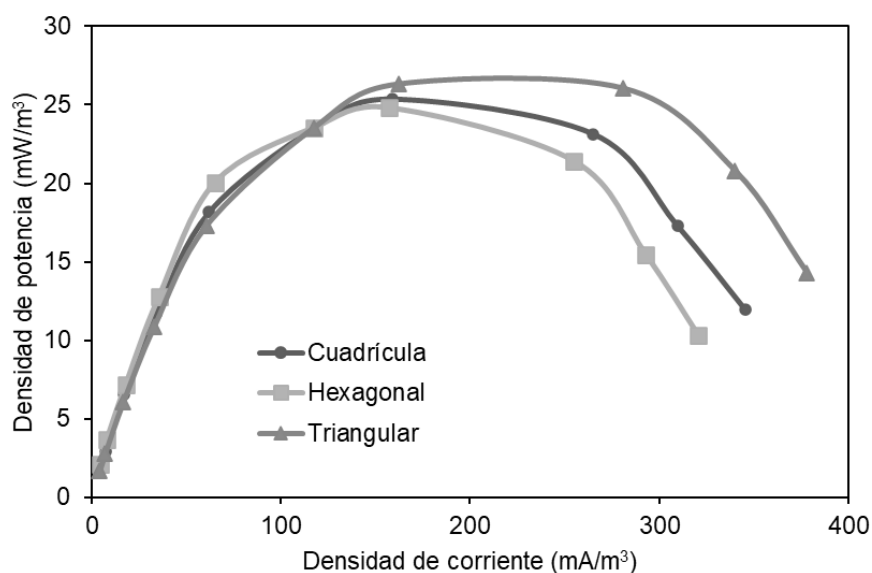


Figura 7. Curvas de densidad de potencia en las CCM empacadas con los ánodos impresos en 3D.

CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que la geometría de los ánodos impresos en 3D influye en el desempeño de las celdas de combustible microbianas utilizadas para la generación de energía eléctrica y el tratamiento de aguas residuales municipales.

Entre las configuraciones evaluadas, la geometría de cuadrícula presentó el mejor comportamiento electroquímico, alcanzando el mayor voltaje y la mayor densidad de potencia. Este comportamiento puede estar asociado a una mayor área superficial efectiva y a una estructura interna que favorece la colonización microbiana y la transferencia de electrones hacia el ánodo.

En términos de tratamiento de aguas residuales, todas las configuraciones evaluadas mostraron altas eficiencias de remoción de materia orgánica, con valores superiores al 85% de eliminación de la DQO. Sin embargo, la eficiencia coulombica fue baja en los tres tratamientos, lo cual es característico de sistemas que operan con aguas residuales reales debido a la competencia metabólica entre microorganismos.

En conjunto, los resultados indican que el diseño geométrico de ánodos mediante impresión 3D representa una estrategia prometedora para optimizar el desempeño de las celdas de combustible microbianas. No obstante, se requieren estudios adicionales que evalúen otras configuraciones geométricas, materiales conductores y condiciones de operación para mejorar la eficiencia energética de estos sistemas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aelterman, P., Rabaey, K., Clauwaert, P., y Verstraete, W. (2006). Microbial fuel cells for wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 54(8), 9-15.
- Ahmed, S., Rozaik, E., y Abdelhalim, H. (2015). Effect of configurations, bacterial adhesion, and anode surface area on performance of microbial fuel cells used for treatment of synthetic wastewater. *Water, Air, y Soil Pollution*, 226(9), 300.
- Banerjee, A., Calay, R. K., y Mustafa, M. (2022). Review on material and design of anode for microbial fuel cell. *Energies*, 15(6), 2283.
- Bazina, N., Ahmed, T. G., Almdaaf, M., Jibia, S., y Sarker, M. (2023). Power generation from wastewater using microbial fuel cells: A review. *Journal of biotechnology*, 374, 17-30.
- Bermúdez Montaña, M. A., y Bernal Aragón, E. D. (2018). Implementacion de una celda de combustible microbiana a escala laboratorio para generacion de energia electrica.
- Bian, B., Shi, D., Cai, X., Hu, M., Guo, Q., Zhang, C., ... y Yang, J. (2018). 3D printed porous carbon anode for enhanced power generation in microbial fuel cell. *Nano Energy*, 44, 174-180.
- Chen, X., Cui, D., Wang, X., Wang, X., y Li, W. (2015). Porous carbon with defined pore size as anode of microbial fuel cell. *Biosensors and Bioelectronics*, 69, 135-141.
- Cohen, B. (1931). The bacterial culture as an electrical half-cell. *Journal of Bacteriology*, 21(1), 18-19.
- Corona-Martínez, D. A., Martínez-Amador, S. Y., Rodríguez-De la Garza, J. A., Laredo-Alcalá, E. I., y Pérez-Rodríguez, P. (2025). Recent Advances in Scaling up Bioelectrochemical Systems: A Review. *BioTech*, 14(1), 8.

- Di Lorenzo, M., Scott, K., Curtis, T. P., y Head, I. M. (2010). Effect of increasing anode surface area on the performance of a single chamber microbial fuel cell. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 40-48.
- Franks, A. E., y Nevin, K. P. (2010). Microbial fuel cells, a current review. *Energies*, 3(5), 899-919.
- Gnana Kumar, G., Kirubaharan, C. J., Udhayakumar, S., Ramachandran, K., Karthikeyan, C., Renganathan, R., y Nahm, K. S. (2014). Synthesis, structural, and morphological characterizations of reduced graphene oxide-supported polypyrrole anode catalysts for improved microbial fuel cell performances. *ACS Sustainable Chemistry y Engineering*, 2(10), 2283-2290.
- Gude, V. G. (2016). Wastewater treatment in microbial fuel cells—an overview. *Journal of cleaner production*, 122, 287-307.
- GUZMÁN, Y. R. (2016). IMPLEMENTACIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANO A PARTIR DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA. Trabajo de grado, Universidad de la Costa, Barranquilla.
- Kalathil, S., Patil, S. A., y Pant, D. (2018). Microbial fuel cells: electrode materials. *Encyclopedia of interfacial chemistry*, 309, 318.
- Logan, B. E. (2008). *Microbial fuel cells*. John Wiley & Sons.
- Logan, B. E., y Regan, J. M. (2006). Microbial fuel cells—challenges and applications. *Environmental science y technology*, 40(17), 5172-5180.
- Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W., y Rabaey, K. (2006). Microbial fuel cells: methodology and technology. *Environmental science y technology*, 40(17), 5181-5192.
- Luo, Y., Zhang, R., Liu, G., Li, J., Li, M., y Zhang, C. (2010). Electricity generation from indole and microbial community analysis in the microbial fuel cell. *Journal of Hazardous Materials*, 176, 759-764.
- Mahto, K. U., y Das, S. (2025). Electroactive biofilm communities in microbial fuel cells for the synergistic treatment of wastewater and bioelectricity generation. *Critical Reviews in Biotechnology*, 45(2), 434-453.

- Medina Mesa, S. A., y Zapata Rojas, M. J. (2017). Evaluación de la producción de energía eléctrica y disminución de DQO en agua residual sintética mediante celdas de combustible microbianas a escala laboratorio.
- Mustakeem. (2015). Electrode materials for microbial fuel cells: nanomaterial approach. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 4(4), 22.
- Oliveira, V. B., Simões, M., Melo, L. F., y Pinto, A. M. F. R. (2013). Overview on the developments of microbial fuel cells. *Biochemical engineering journal*, 73, 53-64.
- Pant, D., Van Bogaert, G., Diels, L., y Vanbroekhoven, K. (2010). A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresource technology*, 101(6), 1533-1543.
- Qazani, M. R. C., Ghasemi, M., y Asadi, H. (2024). Optimizing microbial fuel cells with multiple-objectives PSO and type-2 fuzzy neural networks. *Fuel*, 372, 132090.
- Qiao, Y., Li, C. M., Bao, S. J., y Bao, Q. L. (2007). Carbon nanotube/polyaniline composite as anode material for microbial fuel cells. *Journal of power sources*, 170(1), 79-84.
- Ríos Lara, S. C. (2016). Generación de bioelectricidad microbiana con estiércol de ganado vacuno, mediante celdas de combustible microbiano, Estación Experimental Tunshi ESPOCH (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).
- Rismani-Yazdi, H., Carver, S. M., Christy, A. D., y Tuovinen, O. H. (2008). Cathodic limitations in microbial fuel cells: an overview. *Journal of Power Sources*, 180(2), 683-694.
- Slate, A. J., Whitehead, K. A., Brownson, D. A., y Banks, C. E. (2019). Microbial fuel cells: An overview of current technology. *Renewable and sustainable energy reviews*, 101, 60-81.
- Taufemback, W. F., Hotza, D., Recouvreux, D. D. O. S., Calegari, P. C., Pineda-Vasquez, T. G., Antonio, R. V., y Watzko, E. S. (2024). Techniques for obtaining and mathematical modeling of polarization curves in microbial fuel cells. *Materials Chemistry and Physics*, 315, 128998.

- Tharali, A. D., Sain, N., y Osborne, W. J. (2016). Microbial fuel cells in bioelectricity production. *Frontiers in life science*, 9(4), 252-266.
- Wang, H., Lin, J., y Shen, Z. X. (2016). Polyaniline (PANI) based electrode materials for energy storage and conversion. *Journal of science: Advanced materials and devices*, 1(3), 225-255.
- Yang, H., Chen, J., Yu, L., Li, W., Huang, X., Qin, Q., y Zhu, S. (2022). Performance optimization and microbial community evaluation for domestic wastewater treatment in a constructed wetland-microbial fuel cell. *Environmental research*, 212, 113249.
- Yin, H., Zhang, M., Xu, X., y Chen, X. (2026). Modulation of biomass-based anode specific surface area and electrical conductivity on the enhancement of microbial fuel cell power generation capacity. *Journal of Chemical Technology y Biotechnology*, 101(2), 355-366.
- You, J., Preen, R. J., Bull, L., Greenman, J., y Ieropoulos, I. (2017). 3D printed components of microbial fuel cells: Towards monolithic microbial fuel cell fabrication using additive layer manufacturing. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 19, 94-101.